

補助事業番号 2020M-170

補助事業名 2020年度 被曝レスな超音波による皮質骨硬さ計測技術の開発 補助事業

補助事業者名 同志社大学 理工学部 電気工学科 超音波エレクトロニクス・応用計測研究室

1 研究の概要

本研究では、被曝レスで非侵襲な超音波法を用いて、骨弾性の計測装置開発を目指した。骨折により生活の質(QOL)が大幅に低下する脛骨や大腿骨、橈骨などの長骨を対象とし、これらの骨の体荷重方向を伝搬する縦波と横波音速の同時超音波計測手法の開発を進めた。音速の二乗と密度の積が弾性に相当することから、臨床で骨の音速評価が可能となると、骨弾性の変化を検知できる。すでに軟組織については超音波診断装置が幅広く利用されているが、骨診断の分野では超音波法の利用は踵骨など限定的である。超音波法は、X線法のように被曝がなく安全である。つまり、成長期の子供や動物にも利用できるだけでなく、短期間で繰り返し計測可能である。そこで長骨の弾性評価が可能となれば、高齢化社会での大きな問題である骨粗鬆症の診断だけでなく、骨劣化を誘発する抗がん剤などの薬剤の効果や、糖尿病などの内分泌疾患による二次性骨粗鬆症の評価、成長期の骨評価など、様々な新しい骨の診断が可能となる。

2 研究の目的と背景

骨折はQOLを大幅に低下させる。特に高齢者の脚部骨折は寝たきりから脚部の筋力と体全体の機能低下へとつながるため、大きな社会問題となっている。骨折に至る前に、骨粗鬆症などによる骨の劣化を早期診断し、治療を開始する必要がある。しかし、現状では骨密度(カルシウム量)は主に医療機関で測定可能なX線計測で診断されており、骨粗鬆症予備軍の評価は難しい。またヒトだけでなく、四肢の疾患が極めて問題となる競走馬などでも、トレーニングによる脚部の骨の炎症や骨折の評価が重要となっている。

骨評価の主流となるX線法は、被曝のため繰り返し利用ができないうえ、大型動物への適用が難しい。また、計測できるのは骨密度であり、骨折に関連する骨の他の物性量(弾性やしなやかさなど)の評価が難しい。一方、被曝がない超音波骨計測装置はポータブルで安価であり、得られる骨中の音速値は弾性を反映するため、X線法では不可能な骨物性を評価する手法として期待されている。しかし、現在ヒト用に利用されている踵骨の超音波測定では、長骨や大腿骨頸部の評価、特にせん断方向骨折に関連する骨の評価は難しい。そこで近年、欧州や日本で体荷重を支える長骨の体荷重方向の縦波音速計測からその弾性を推定するAxial Transmission(AT)法が実用化され始めた。しかし、まだこれらは縦波音速計測による圧縮弾性の評価であり、高齢者に多い大腿骨頸部骨折などで問題となる骨のせん断強度や弾性の評価は難しい。もっとも、超音波法を大型動物の骨評価に応用する発想は現状では皆無である。今後、臨床で骨の圧縮弾性とせん断弾性の計測が安全で比較的小型の超音波装置で実現できれば、ヒトや大型動物など様々な用途が期待できる。

3 研究内容

(1) 皮質骨の横波・縦波音速の計測技術の開発

ヒト脛骨や橈骨、ウマの中足骨や中手骨を念頭に、まず板状および円管状の骨試料をウシやブタなどの大型動物の大腿骨皮質骨を用いて作成した。医療診断装置に使用される500k-3MHzの範囲の周波数のパルス超音波を用いて骨中を長手方向に伝搬する超音波を計測するシステムを構築した。このシステムは一對の送受波器からなるが、受波器を機械的に掃引することで、AT法で用いられるアレイ型受波器と同様な計測を実現することができる。そこで、板状・円管試料の表面に皮膚を模擬したゲルを設置して、超音波の入射・受波角度を変えながらAxial Transmission法で縦波と横波の計測を試みた。その結果、板状や円管状試料では、横波の臨界角近傍の高角度で安定して横波音速が計測できることを見出した。

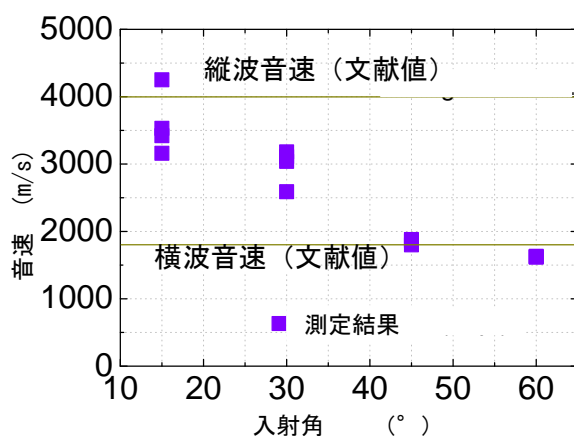


図1 音波の入射角と計測された音速の関係（ブタ円管状骨試料）

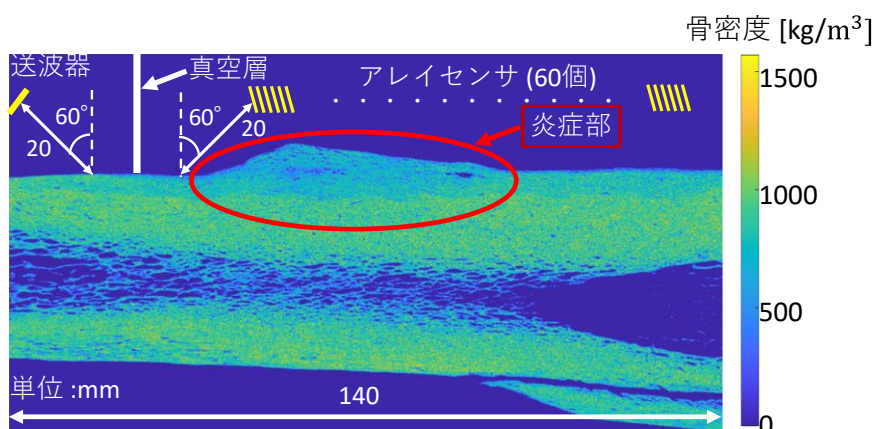


図2 シミュレーション用ウマ第三中足骨デジタルモデル

このため、実際に管径が変化し皮質骨厚さも不均一なブタ脚部の管状骨をもちいて、同様な計測を行ったところ、複雑な形状にも関わらず、同様に高角度で安定して横波音速を計測できた。また、この計測は表面に皮膚を模擬したゲルが表面に存在する場合も安定して行うことができ、臨床でも十分利用可能であることが見出された。図1に超音波の入射・受波角度とブタ脚部の管状骨を用いて計測された音速の関係を示す。横波音速は文献値であるが、高い入射角度で比較的よく一致していることが確認できる。なお、低い入射角度での計測結果は縦波音速に近い値であるが、ばらつきが大きい。しかし、低い入射角度ではすでにFirst Arriving Signal (FAS) やモード解析による音速評価法も提案されており、これらの手法も今後適用可能と考える。

次により複雑な骨の計測の可能性を探るために、炎症をもったサラブレッドの中足骨の評価を試みた。この中足骨中の音速を超音波パルス法で詳細に測定し、音速分布を得るとともに、骨形状と骨密度を3次元CTデータで評価した。これらの結果から、中足骨幹部のシミュレーション用デジタルモデルを作成に成功した。このモデルは不均一かつ弾性異方性をもつ。このモデルを用いて、弾性時間領域有限差分法を用いて、臨床に近い実サイズの音波伝搬シミュレーションに成功した。

図2に作成したデジタルモデルとシミュレーションで設定した送受波器の配置を示す。ブタ試料を用いた実測に近い条件で送受波シミュレーションを行ったところ、図3で示すように、高入射角で安定して低い音速の横波を計測できること、特に、表面凹凸が存在する炎症部位では、縦波音速の分散が激しく、その計測は難しいが、横波は安定して計測されることを見出した。つまり、当初の目的である横波計測だけでなく、超音波による横波計測が実は複雑な形状の骨の評価では縦波以上に効果がある可能性を確認した。

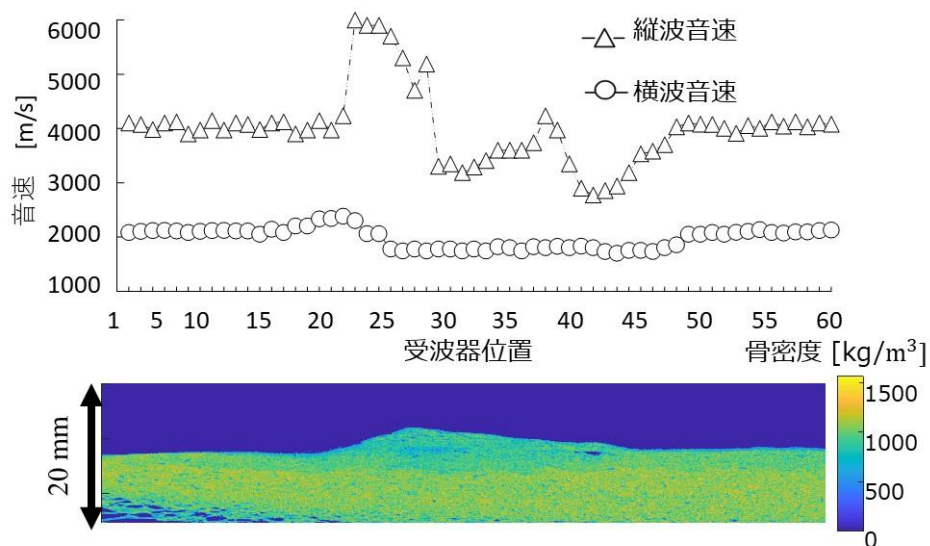


図3 シミュレーションで推定された縦波・横波音速と計測部位

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

安全な超音波法による骨計測は、踵骨が中心で、体荷重を支える脚部などの皮質骨の評価は縦波や板波の計測手法の臨床応用が開始されている状況である。本研究では、これまで難しかった管状骨の横波計測手法を開発した。また、骨のデジタルモデルを用いたシミュレーションにより、見かけの縦波音速と横波音速を同時に評価することで、ヒトや動物の骨炎症評価にも応用可能な計測手法を提案した。シミュレーションは、十分実現可能な超音波計測システムの設定している。本研究の結果を用いて臨床用計測システムを実現できれば、新しいコンセプトの骨診断が可能となる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究室では、骨粗鬆症診断を目的とし、海綿骨評価を中心に、超音波骨計測装置の開発を進めてきた。本研究は新たに皮質骨の縦波音速や横波音速の臨床計測の実現可能性を高めた内容であり、新しい評価手法への挑戦である。骨の全体像を、安全な超音波法で正しく診断する技術開発の一つの成果として重要と考えている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

学会発表

- 1) 高田峰聖, 田村周久, 三田宇宙, 中村司, 宮下和輝, 松川真美, 超音波法によるウマ皮質骨における骨膜炎の評価, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2020.7)
- 2) M. Takata, N. Tamura, H. Mita, T. Nakamura, K. Miyashita, M. Matsukawa, Effects of inflammation on the longitudinal wave velocity in equine cortical bone, IEEE International Ultrasonics Symposium 2020 (2020.9)
- 3) 宮下和輝, 高田峰聖, 見崎貴史, 千葉恒, 三田宇宙, 田村周久, 松川真美, せん断波のAxial Transmission 法による炎症骨の評価, 第41回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム (2020.11)
- 4) 宮下和輝, 見崎貴史, 高田峰聖, 千葉恒, 三田宇宙, 田村周久, 松川真美, ウマ中足骨炎症検出のためのAxial Transmission法の開発, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2021.1)
- 5) 谷澤壮太, 宮下和輝, 高田峰聖, 田村周久, 三田宇宙, 松川真美, 骨膜炎が第三中足骨の音速に及ぼす影響 —健全骨との比較—, 電子情報通信学会 超音波研究会 (2021.3)

技術報告論文

- 1) 宮下和輝, 見崎貴史, 高田峰聖, 千葉恒, 三田宇宙, 田村周久, 松川真美, ウマ中足骨炎症検出のためのAxial Transmission法の開発, 電子情報通信学会技術研究報告 US2020-58(2021)
- 2) 谷澤壮太, 宮下和輝, 高田峰聖, 田村周久, 三田宇宙, 松川真美, 骨膜炎が第三中足骨の音速に及ぼす影響 —健全骨との比較—, 電子情報通信学会技術研究報告 US2020-79(2021)

このほか、投稿中論文1件。

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 同志社大学工学部(ドウシシャダイガク リコウガクブ)

住 所: 〒610-0321

京都府京田辺市多々羅都谷1-3

担 当 者: 教授 松川真美(マツカワマミ)

担 当 部 署: 超音波エレクトロニクス・応用計測研究室

(チョウオンパエレクトロニクス・オウヨウケイソクケンキュウシツ)

E - m a i l: mmatsuka@mail.doshisha.ac.jp

U R L: <https://use.doshisha.ac.jp/index.html>